

УДК 621

Ю.Г. Гуцаленко, Харьков, Украина

ЗАМЕТКИ ПО ИСТОРИИ, СИСТЕМАТИКЕ И МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОРЕЗНЫХ ПРУЖИН

Стаття присвячена феномену прорізних пружин як відгуку на виклики розвитку техніки останніх поколінь. Розглядаються успіхи і проблеми розробки моделей прорізних пружин та питання їх систематики і вдосконалення. Виконаний огляд свідчить про техніко-технологічну необхідність, сучасну актуальність і перспективність подальших конструкторських і розрахункових розробок прорізних пружин.

Статья посвящена феномену прорезной пружины как отклику на вызовы развития техники последних поколений. Рассматриваются успехи и проблемы разработки моделей прорезных пружин и вопросы их систематики и совершенствования. Выполненный обзор свидетельствует о технико-технологической необходимости, современной актуальности и перспективности дальнейших конструкторских и расчетных разработок прорезных пружин.

The article is devoted to the phenomenon of a slotted spring as a response to the challenges of the development of technology of the latest generations. The successes and problems of the development of models of slotted springs and the questions of their systematic and improvement are considered. The performed review shows the technical and technological need, the current relevance and the prospects for further design and development of slotted springs.

1. Феномен прорезной пружины как отклик на вызовы развития техники

В 1938 году Сергей Дмитриевич Пономарев, 30-летний выпускник российского МВТУ (ныне МГТУ) им. Н. Э. Баумана и доцент кафедры сопротивления материалов в нем, публикует первую в мировой истории [1] монографию по расчету витых пружин [2] и становится национальным лидером в этом (пружины) направлении развития науки и техники. Значительно позднее, в 60-е и 70-е годы уже послевоенного периода, что, по-видимому, объясняется закрытостью тематики выполняемых работ и их подчиненностью запросам оборонной промышленности, из возглавляемой с 1948 г. С. Д. Пономаревым научной школы прикладной механики МВТУ им. Н. Э. Баумана, ведущего в подготовке специалистов для учреждений и предприятий советского военно-промышленного комплекса, в особенности авиационно-космических, трудами Сергея Дмитриевича, его коллег и учеников, вовлеченных в практические задачи создания новой техники новых возможностей, выходят основные известные из литературных источников аналитические разработки прогностически-проектных расчетов прорезной пружины [3-7], использующие опыт общей теории и реальной практики

кольцевых пружин витой и других конструкций, в особенности волнистых шайб (рис. 1, а) и тарельчатых (рис. 1, б-в).

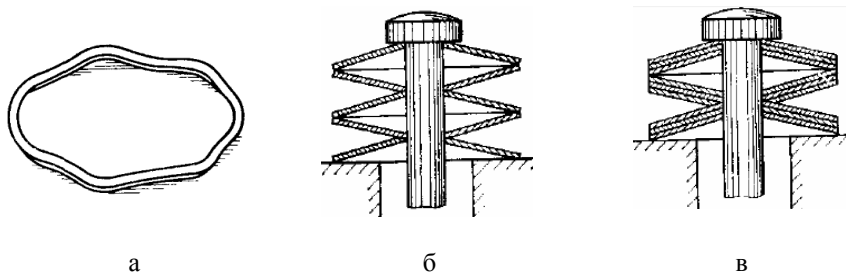


Рисунок 1 – Общий вид кольцевой волнистой пружинной шайбы (а) [8] и эскизные разрезы общего вида комплектов тарельчатых пружин (б, в) в последовательной (б) и пакетно-последовательной установке (в) [7]

Аналитика прорезных пружин использует подходы к расчету витых, поскольку по конструктивной сути оба вида имеют многокольцевую структуру. В отличие от не имеющей четкой (барьерной) кольцевой дискретизации непрерывной внутри пружины спирали витой пружины, кольца прорезной в устоявшемся ее представлении [7, 8] разделены равноширокими прорезами и по границам последних в горизонтальном сечении соединены барьерами-перемычками (рис. 2, а).

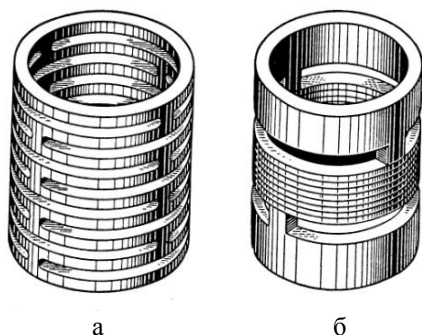


Рисунок 2 – Кольцевые пружины со связанными (прорезная пружина, а) и со свободными (б) кольцами [3]

Прорезные пружины относятся к классу жестких пружин [9, 10, 6]. Их применяют в тех случаях, когда радиальные габариты должны быть малыми, а несущая способность – большой [6]. Изготавливают прорезные пружины из цилиндрических труб фрезерованием сквозных пазов-прорезей. Они представляют собой единое тело из плоских колец, некоторым определенным образом соединенных перемычками. Все кольца, составляющие такие пружины, деформируются одинаково, причем каждое из них

закручивается и изгибается. Наиболее опасными являются сечения у перемычек и равноудаленные от них. Прорезные пружины закрепляют,

например, с помощью резьбовых соединений на торцах и они могут служить в равной степени как пружинами сжатия, так и пружинами растяжения. В отличие от винтовых пружин растяжения - сжатия прорезные пружины при осевом нагружении перемещаются строго поступательно, что предопределяет повышенную прогнозируемость их поведения и, в сочетании с относительно высокими компактностью и несущей способностью, перспективы использования в составе различных устройств, в особенности повышенной точности.

По источнику из научной школы прикладной механики МВТУ им. Н. Э. Баумана [5], прорезная пружина явилась детищем технических вызовов периода второй мировой войны. Первые прямые публикации по проблематике прорезных пружин в открытых источниках информации обнаруживаются в 60-х годах.

Наиболее ранней из публикаций в открытой печати, связанных с разработками конструкций, использующих прорезную пружину, по-видимому следует считать работу тоже выпускника МГТУ им. Н. Э. Баумана (1940 г.) И. А. Биргера, специалиста-прочниста ЦИАМ им. П. И. Баранова и по совместительству профессора МФТИ [11] (1961 г.), в период студенчества выполнявшего научную работу на кафедре сопротивления материалов [12], где в это время блистал расчетами пружин доцент С. Д. Пономарев.

На базы данных из этой работы [11], относящихся в определении автора к кольцевым пружинам, С. Д. Пономарев в 8-й главе своего итогового труда [7], посвященной кольцевым волнистым шайбам, ссылается как на основные. Очевидным объяснением применимости [11] и к кольцевым волнистым пружинным одновитковым конструкциям (шайбам), и к прорезным пружинам является подобие расчетных схем. Расчетной схемой кольцевой волнистой

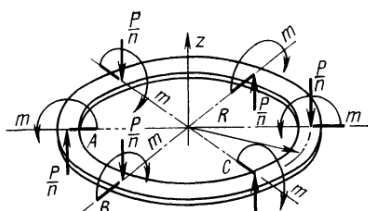


Рисунок 3 – Расчетная схема кольцевой волнистой шайбы [7]

шайбы [7] (рис. 3) является плоское кольцо, нагруженное в местах контакта с опорными поверхностями (здесь заметим: в случае прорезной пружины – по перемычкам) силами нормально плоскости кольца; аналитические решения для изгибающих и крутящих моментов определяются после раскрытия статической неопределенности.

В этой же 8-й главе [7] прямо указывается (процитируем): «Расчет кольца в рассматриваемых условиях нагружения приводится при расчете прорезных пружин (см. гл. 10)». По сути это признание превосходства ученика (И. А. Биргера) в части данных расчетов, а также в расчетах прорезных пружин. Поэтому не столь уж неожиданным выглядит

представляющееся все же системологически весьма спорным утверждение самого И. А. Биргера [6, 8] о том, что кольцевые волнистые пружины являются разновидностью прорезных пружин. Почему спорным? Ну нет же перемычек в кольцевых волнистых пружинах, а это неотъемлемый атрибут прорезной пружины! Да и другие допущения весьма серьезные, имея в виду во-первых, единственность кольца волнистой пружины (если не рассматривать пакетную сборку), во-вторых – его исходную (заданную) неплюскость.

Помимо сказанного выше, дополнительным и также существенным аргументом приоритетности работы [11] в обеспечении расчетов прорезных пружин является объяснение отсутствия ожидаемого прямого терминологического указания на это в предпосланном [11] заголовке.

Показательно, что в вышедшем в 1959 году первом издании возглавляемого И. А. Биргером справочного пособия по расчетам на прочность деталей машин [13], впоследствии выдержавшем три переиздания под его же руководством, не содержится никакой информации о прорезных пружинах. Как не упоминаются они и в выпущенной годом раньше (в 1958 г.), специально посвященной конструированию пружин монографии [14] Ростислава Стефановича Курендаша, впоследствии (1966 г.) основателя кафедры приборов точной механики Львовской политехники [15]. Работу над вторым изданием [3] справочного пособия по расчетам на прочность деталей машин (1966 г.) И. А. Биргер завершает в должности заместителя начальника и руководителя работ ЦИАМ им. П. И. Баранова по созданию двигателей ракеты-носителя «Протон» [12], естественно обладая расширенными профессионально-информационными возможностями. Объем справочника вырастает на треть. В нем прорезные пружины рассматриваются, но не самостоятельно, а как разновидность кольцевых, отличающаяся связанностью колец [3], рисунок 2. Отмечается подверженность прорезных пружин изгибу и кручению и, по аналогии с расчетом кольцевых пружин с двумя опорами, по [11] приводятся формулы для расчета величин возникающих при этом максимальных приведенных напряжений, усилий, перемещений, а также жесткости.

К аналогичным задачам конструкторских расчетов опертых колец, нагруженных перпендикулярно своей плоскости, позднее обращаются и другие исследователи, например [16, 4, 17].

С позиций определения места прорезных конструкций в общей систематике пружин интересен подход, изложенный между переизданиями [3] и [6] фундаментальным справочным изданием [18], подготовленным другим составом авторов под общей редакцией выпускника КПИ Владимира Николаевича Челомея – профессора того же МВТУ им. Н. Э. Баумана (с 1952 г.), директора и пожизненного генерального конструктора

выделившегося из структуры того же ЦИАМ им. П. И. Баранова ОКБ 52 (НПО машиностроения), объект специализации которого составили крылатые ракеты (с 1944 г.). 11-ю главу этого издания, среди других упругих элементов вибрационных машин включающую рассмотрение пружин, подготовили Михаил Владимирович Хвингия, заведующий отделом теории машин НИИ механики машин и полимерных материалов АН Грузии, и Эгон Эдгарович Лавендел, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов Рижского политехнического института. Прорезные пружины

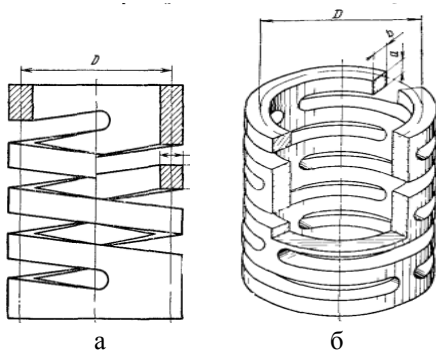


Рисунок 4 – Прорезные пружины:
с винтовым пазом (а)
и плоско-прорезная (б) [18]

лаконично описаны ими в полустраничных разделах «Прорезные пружины с винтовым пазом» (рис. 4, а) – по сути это та же конструкция обычной витой пружины с обычными для витых пружин сжатия специально обработанными перпендикулярно оси пружины опорными витками по ее торцам, сохранившаяся в современном инструментарии конструктора [19], но с возможностью варьирования не только площадью (диаметром) витков, но и пропорцией сторон их прямоугольного сечения, и «Кольцевые пружины» (рис. 4, б).

Раздел «Кольцевые пружины» по сути описывает прорезную пружину характерной конструкции, но в терминологической постановке («цилиндрические плоско-кольцевые пружины») еще перекликается с определением [3] прорезной пружины как кольцевой со связанными кольцами.

Дальнейшую системологическую эволюцию представлений о прорезной пружине характерно отображают последующие переиздания того же справочного пособия по расчетам на прочность деталей машин. В третьем [6] (1979 г.) и четвертом [8] (1993 г.) изданиях рассмотрению прорезной пружины выделяется чуть больше страницы, но уже в обособленном видовом статусе, с расчетом в общем виде для произвольного числа n прорезей или перемычек на торце кольца и примером расчета для $n=2$.

Настольной у современных расчетчиков [20, 21] наряду с [8] является опубликованная С. Д. Пономаревым в завершающем его профессиональную деятельность и весь жизненный путь 1980-м году в соавторстве

с Л. Е. Андреевой книга [7], в которой прорезной пружине посвящена отдельная (10-я) глава.

Следуя современному научно-техническому спросу, прорезная пружина включена и рассмотрена изданием [20] среди избранных перспективных конструкций использования САПР SolidWorks (в SolidWorks Simulation) применительно к расчетам прочности и устойчивости.

2. Аналитическое и имитационное моделирование прорезной пружины

Как отмечалось выше, аналитические решения функциональных характеристик прорезной пружины известны из теории сопротивления материалов в разработках советских ученых. Украинские исследователи из Винницкого национального технического университета [21], на основании анализа литературных источников и современной расчетной практики с экспериментальной апробацией, рассматривая методики современного аналитического расчета прорезных пружин, представленные авторскими коллективами из МФТИ-ЦИАМ им. П. И. Баранова [8] и из МГТУ им. Н. Э. Баумана [7], отдают предпочтение второй – по мотивам большей простоты при достаточной точности. В другом исследовании [20], отличающемся большей гибкостью и свободой использования специализированного программного обеспечения реализации конечно-элементного подхода, наоборот, предпочтение в сопоставительном обращении к аналитическим расчетам отдается [8].

Компьютерное имитационное моделирование прорезных пружин и их поведения под нагрузкой как конечно-элементных объектов использует различное современное программное обеспечение. Например, в практике [21] – программный пакет Компас-3D V13 (подпрограмма APM FEM: прочностной анализ).

Выше уже отмечалось также, что в современной практике конструирования и исследования поведения под нагрузкой прорезных пружин применяется САПР SolidWorks совместно с интегрированными расчетными модулями семейства Simulation (ранее – CosmosWorks) [20].

Как покажем дальше, с использованием виртуальной информации по результатам моделирования [20], подобные исследования вооружают разработчика априорно неочевидной важной информацией для обоснованного принятия рациональных конструкторско-технологических решений.

Постановка и решение типовой задачи имитационного моделирования для прорезной пружины с сопоставлением его расчетных результатов с аналитическими решениями теории сопротивления материалов [8] выполнены [20] для цилиндрического объекта из изотропного материала

(конструкционная сталь) с радиальным расположением границ прорезей в ее теле (табл. 1).

Таблица 1 – Общий вид и геометрия прорезной пружины (пример [20])

Общий вид	Наименование (обозначение)	Значение	Вид пружины в сечении по перемычкам (А-А)
	Внутренний диаметр	82 мм	
	Наружный диаметр	106 мм	
	Толщина кольца	13 мм	
	Ширина прорези	2 мм	
	Центральный угол	160 °	
	Число колец	11	

Численные расчеты осадки прорезной пружины как разницы перемещений противоположных торцов по ее имитационной модели под нагрузкой (рис. 5) проведены [20] для двух вариантов задания граничных условий. В обоих исключено движение модели объекта как жесткого целого вдоль оси с пренебрежением податливостью торцевых опор, вторым (вариант Б, табл. 2) идеально жесткими дополнительно опорам модели объекта рассматриваются также его перемычки.

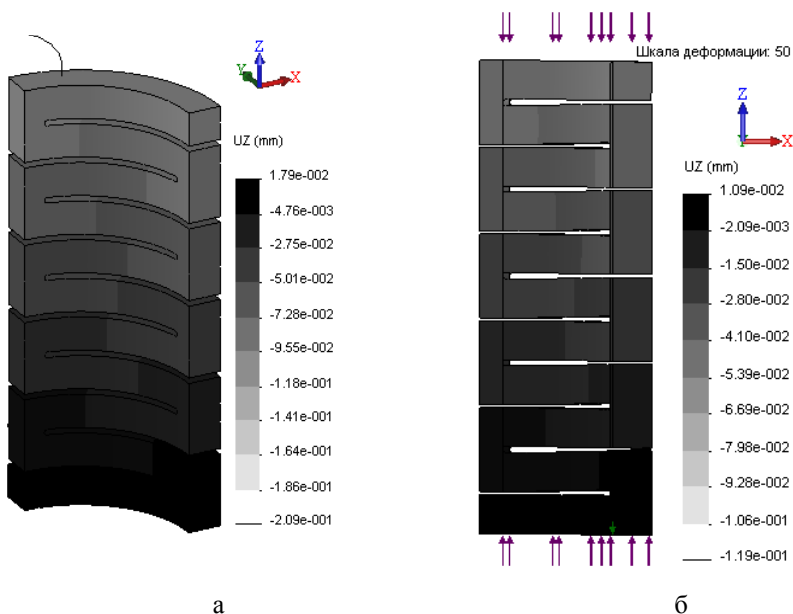


Рисунок 5 – Диаграммы осевого перемещения имитационных моделей [20]

Таблица 2 – Осевая осадка пружины по таблице 1 под нагрузкой 1 кН, мм

Расчеты по конечно-элементной модели в SolidWorks Simulation [20]		Расчет по теории сопротивления материалов [8]
Вариант А (рисунок 5, а)	Вариант Б (рисунок 5, б)	
0,191	0,108	0,071

В дополнение к показанному табл. 2 сравнению результатов для осевой осадки пружины по табл. 1 отметим, что оценки для напряжений, полученные из аналитических выражений [8] и конечно-элементным имитационным моделированием [20], отличаются большей сходимостью, с относительной погрешностью средних имитационных ожиданий от 2,3 % (кручение) до 4,0 % (изгиб): максимальные нормальные напряжения, порожденные изгибом кольца, составляют $2,5 \times 10^7$ Па и примерно $(2,3 \dots 2,5) \times 10^7$ Па, а максимальные касательные напряжения, вызванные кручением, $8,6 \times 10^6$ Па и примерно $8,8 \times 10^6$ Па соответственно.

Практически важнейшим с точки зрения эффективности использования и аналитических подходов, и подсистемы Simulation в САПР SolidWorks, в том числе в разработках конструкции, является повышение адекватности расчетных зависимостей и реалистичности имитации, а также следующих из них оценок. Поэтому вместе с автором [20] и на наш взгляд полезными дополнительными ремарками поясним следующее из табл. 2 существенное расхождение результатов, полученных аналитическим и имитационным моделированием.

Если исключить фактор качества конечно-элементной дискретизации, тем более, что в работе [20] конвенциональному обращению к алгоритму с использованием диаграмм Делано-Вороного предпочтен более гибкий, применительно к телам с криволинейными границами использующий элементы второго порядка, то расхождения в расчетах (табл. 2) следуют из расхождений исходных посылок аналитической модели и граничных условий имитационного моделирования.

Во всех известных из теории сопротивления материалов аналитических рассмотрениях и следующих им прикладных практических расчетов, и на это обращает внимание и автор [20], используются предположения об абсолютной жесткости перемычек и о функционировании деформируемых колец как плоских тонких балок, испытывающих исключительно изгиб и кручение.

Оба допущения, особенно второе, исключаящее из рассмотрения поперечный сдвиг и растяжение-сжатие в кольцах, тем самым уменьшают расчетную податливость рассматриваемой системы колец с перемычками между ними относительно реальности и, соответственно, осевую осадку объекта в целом.

Здесь следует заметить, что еще в представленной в 1975 году к печати С. Д. Пономаревым и выполненной в возглавляемой им научной школе прикладной механики работе [4], а также в уточненном и расширенном варианте ее представления [5], расчетно-аналитически определена величина сдвиговой составляющей в общей осадке прорезной пружины, численно более влиятельной в конструкциях большей кривизны, а в рекомендациях [6], где предложен расчет прорезной пружины при числе прорезей (колец) $n=2$, прямо указывается на допустимость пренебрежения деформацией сдвига в расчете осадки прорезных пружин лишь при малом числе перемычек между соседними кольцами.

3. Совершенствование имитационных моделей прорезной пружины

Как следует из таблицы 2, пренебрежение податливостью перемычек (вариант Б по сравнению с вариантом А) повысило жесткость пружины почти в два раза, что радикально приблизило численную оценку к аналитической.

С этих позиций показательно исследование поведения конечно-элементной модели все той же прорезной пружины (табл. 1), находящейся под той же осевой нагрузкой 1 кН, но с дополнением граничных условий искусственным для изначально избранной [20] материалом исследуемой пружины конструкционной стали сдерживанием поперечно-сдвиговых процессов в ней. Для этого реальный модуль сдвига был увеличен в 1000 раз. Для предотвращения конфликта с программным обеспечением расчетов в SolidWorks Simulation в связи с автоматическим воспроизводством в нем расчетного модуля сдвига для изотропных материалов как зависимого параметра, функционально определяемого двумя другими постоянными – модулем Юнга и коэффициентом Пуассона, рассматриваемый изотропный материал интерпретирован в формально анизотропный (ортогонально-ортотропный), а фактически квазианизотропный, так как интерпретация заключалась в задании различных по осям координат значений искусственного модуля сдвига, но с минимальными отклонениями от избранного искусственного номинала $((2,1 \pm 0,1) \times 10^{11} \text{ Н/м}^2)$, допустимыми системой SolidWorks Simulation для восприятия всех трех значений параметра как различных. Следует отметить, что заданный как формально анизотропный материал при этом рассматривается системой SolidWorks Simulation как изотропный, так как критерием в этом рассмотрении является ортогонально-ортотропное постоянство модуля Юнга.

При выполненном таким образом [20] тысячекратном завышении реального модуля сдвига, имитирующем абсолютную жесткость материала объекта исследования, результирующая расчетная осевая осадка рассматриваемой конечно-элементным моделированием прорезной пружины составила 0,035 мм. Двукратное отставание от аналитического результата

(0,071 мм, таблиця 2), отнесем к одновременному с искусственно вызванным уменьшением деформации от изгиба уменьшению и вклада в общую деформацию кручения колец, солидаризуясь с автором [20], и поясним это пропорциональным изменению жесткости B поперечного сечения кольца при изгибе изменением его жесткости C при кручении, которая согласно представленному [8] аналитическому решению вносит существенный вклад в общую податливость объекта. Так, в рассматриваемом аналитическом решении, согласно используемой [8] поддержке расчетов реляционными базами данных, для идеализированной бесконечно тонкими перемычками прорезной пружины в случае соотношения сторон прямоугольного сечения ее витков ≈ 1 , как это следует из таблицы 1, $C = 0,65B$.

Современная конструкторско-технологическая идеологическая платформа конечно-элементного моделирования в постановке и исследовании в современных САПР, одним из передовых предствителей которых является SolidWorks, предоставляет практически неограниченной гибкости возможности отработки влияния и учета объемной геометрической моделью прорезной пружины, комплексом граничных условий ее нагружения и функциональности тончайших нюансов для повышения реалистичности результатов компьютерного анализа по отношению к эксплуатационной практике.

К таким, дополняющим круг внимания весьма методически обстоятельного и вне всякого сомнения современно актуального во всех звеньях триады учебно-научно-производственных практик исследования [20], можно отнести, например, вопросы геометрии концентраторов напряжений в переходных поверхностях между прорезью и перемычкой, а также распределенного характера передачи перемычке осевой нагрузки прорезной пружины.

Отметим, что на необходимость отдельного внимания к концентрации напряжений в зоне перемычек с приблизительным учетом этого фактора в аналитических расчетах обращал И. А. Биргер в своей первой системной справочной манифестации по прорезной пружине [3]. Современные конечно-элементные исследования применительно к моделированию конкретных специализированных применений прорезных пружин также указывают на важность использования решений с улучшенной геометрией мест концентрации напряжений. В работе [22] показано, что только благодаря оптимизации радиуса скругления в местах резкой смены конфигурации прорезной пружины можно добиться значительного (в несколько раз) снижения статических напряжений и еще более значительного повышения ее циклической прочности.

Показателен в кругу разбора подобных вопросов второго плана выполненный [20] анализ влияния на эксплуатационные характеристики

формы перемычки в поперечном сечении. Теоретическим выкладкам по научным канонам сопротивления материалов постановочно естественна радиусная (секторная) ориентация стенок перемычек внутри прорезей, как это следует, например, из расчетной схемы прорезной пружины [8] и принято в выполненном [20] сравнительном анализе расчетов по конечно-элементной



Рисунок 6 – Поршень с прорезной пружиной после поломки опорного кольца (фрагмент справа) [21]

имитационной модели и по теории (см. вид пружины в сечении, приведенный в табл. 1). В реальных же твердотельных воспроизведениях прорезной пружины, как это видно, например, из иллюстративного материала [21] (рис. 6), следует ожидать более технологичную конструкцию с точки зрения прорезания паза в оболочке заготовки кольцевого кругового сечения, а именно с сегментной ориентацией стенок перемычек внутри прорезей (по хорде).

Из методических соображений анализ влияния на эксплуатационные характеристики формы перемычки в поперечном сечении (вырезы в форме секторов и вырезы в форме сегментов) выполнен [20] для конструкций с относительно небольшими прорезями и для примерно равных площадей перемычек (рис. 7).

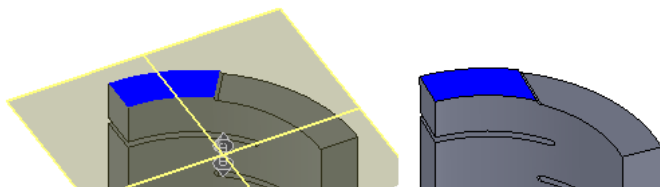


Рисунок 7 – Пружины с радиальными (слева) и сегментными (справа) вырезами: в разрезе (верх) горизонтальной плоскостью выделены участки перемычек [01]

Из представленных [20] диаграмм, результирующих конечно-элементное моделирование пружин по рис. 7 (индифферентные геометрии перемычек в горизонтальной плоскости параметры из таблицы 1) следует, что при идентичной нагрузке значительно разнится и осевая усадка (0,017 мм и 0,013 мм), и максимальные напряжения ($2,64 \times 10^6$ Н/м² и $5,70 \times 10^6$ Н/м²), причем меньшая осадка (следовательно, большая жесткость) и максимальные напряжения характеризуют пружину с сегментными вырезами. Как следует

из приведенного здесь сопоставления и отмечается [20], в рассматриваемых конструктивно-технологических альтернативах приоритет технологических аспектов оборачивается существенным ухудшением характеристик, в частности снижением допустимой (с точки зрения отсутствия необратимых деформаций) нагрузки. Именно это, как следует из экспериментальных данных [21], в первом же пуске устройства привело к поломке по рис. 6 вследствие контакта недопустимо деформированного опорного кольца с охватывающей поверхностью расточки корпуса.

Таким образом, прогнозировать свойства прорезных пружин посредством конечно-элементного анализа предпочтительнее, поскольку неизбежная реальность понижения строгости аналитической расчетной схемы хотя бы из-за реально ненулевой толщины перемычек, а тем более в сочетании с реально сегментной конфигурацией вырезов, значительно снижает реалистичность расчетных ожиданий функционального состояния.

Следует отметить, что как конечно-элементное моделирование [20] (с наложением условия «симметрия»), так и расчетно-аналитические подходы, в том числе в основном упоминаемый здесь в отсылках [8], исходят из выделения и рассмотрения четверти исходного объекта в его объемном симметричном секторировании по вертикалям перемычек.

Заключение

Представленные материалы отражают технико-технологическую актуальность, современную востребованность и перспективность дальнейших конструкторских и расчетных разработок прорезных пружин, в том числе применительно к инновационному совершенствованию техники и технологий механической обработки резанием.

Наибольший интерес к разработке и расчету инновационных конструкций прорезных пружин во всей их истории наблюдается в авиационно-космической отрасли и военно-промышленном сегменте реальной экономики, а также в соответственно ориентированной среде интеллектуальной поддержки высшей технической школы.

Приоритетным инструментом современных конструкторских и расчетных разработок и прогностики эксплуатационного поведения прорезных пружин и использующей их техники является конечно-элементное моделирование в соответствующе базирующихся САПР, например SolidWorks (SolidWorks Simulation) и Компас-3D (APM FEM).

Представленный здесь обзор является первой частью статейной диалогии автора, посвященной истории и современным перспективам разработок прорезных пружин в машиностроительных применениях. Во второй части (Применения и перспективы прорезных пружин в машиностроении) будут рассмотрены прорезные пружины в конструкциях отраслевого

машиностроения и, отдельно, в станкоинструментальных применениях, а также соответственно ориентированные конструкторско-технологические перспективы.

Эту работу автор посвящает благодарной памяти Рафаэля Ашотовича Баласаяна, своего преподавателя по курсу деталей машин в Харьковском политехническом институте в 1974-1975 гг., глубочайшего профессионального эрудита, блестящего лектора и великолепного собеседника, неутомимого просветителя и побудителя машиностроительных инженерных знаний и новаций.

Список использованных источников: 1. Пономарев Сергей Дмитриевич [Официальный сайт кафедры РК5 МГТУ им. Н. Э. Баумана] – <http://rk5.bmstu.ru/index.php/kafedra/istoriya/109-istoriya/242-ponomarev-sergei-dmitrievich>. 2. Пономарев, С. Д. Расчет и конструкция витых пружин / С. Д. Пономарев. – М.: ОНТИ, 1938. – 352 с. 3. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин (справочное пособие) / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Р. М. Шнейдерович; под общ. ред. И. А. Биргера. – 2-е изд., исправл. и доп. – М.: Машиностроение, 1966. – 616 с. 4. Князева, В. А. К расчету толстостенных прорезных пружин / В. А. Князева // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение [Изд. МВТУ им. Н. Э. Баумана]. – 1975. – № 10. – С. 18-22. 5. Князева, В. А. Исследование напряженного и деформированного состояния толстостенных прорезных пружин / В. А. Князева // Расчеты на прочность. – Вып. 18. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 246-256. 6. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с. 7. Пономарев, С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, С. Л. Андреева. – М.: Машиностроение, 1980. – 326 с. 8. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин. Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с. 9. Бидерман, В. Л. Детали машин. Расчет и конструирование: Справочник: Т. 2 / В. Л. Бидерман, В. В. Ермаков, В. В. Каминская [и др.]; под ред. Н. С. Ачеркана. – 3-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1968. – 408 с. 10. Готовцев, А. А. Справочник металлста: Т.1. / А. А. Готовцев, С. П. Демидов, А. В. Карп [и др.]; под ред. С. А. Чернавского и В. Ф. Рецикова. – 3-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1976. – 768 с. 11. Биргер, И. А. Расчет кольцевых изгибных пружин / И. А. Биргер // Расчеты на прочность. – Вып. 7. – М.: Машгиз, 1961. – С. 110-121. 12. Биргер Исаак Аронович [Сайт «Космический мемориал»] – <http://sm.evg.-rumjantsev.ru/des3/birger.htm>. 13. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин (справочное пособие для конструкторов) / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Р. М. Шнейдерович. – М.: Машгиз, 1959. – 459 с. 14. Курендаш, Р. С. Конструирование пружин / Р. С. Курендаш. – Киев: Машгиз. Укр. отд-ние, 1958. – 108 с. 15. Історія кафедри приладів точної механіки [Офіційний сайт Львівської політехніки] – <http://lp.edu.ua/ptm/istoriya-kafedry>. 16. Портер, М. А. Расчет колец, нагруженных перпендикулярно своей плоскости / М. А. Портер, А. Т. Медведенко // Вестник машиностроения. – 1971. – № 2. – С. 9-12. – В надзаг.: Листки для конструктора. 17. Шнайдер, Г. З. Расчет величины перемещения прорезной пружины / Г. З. Шнайдер, А. С. Розенберг, А. З. Фурман [и др.] // Вестник машиностроения. – 1983. – № 5. – С. 41-42. 18. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). – Т. 4: Вибрационные процессы и машины / Г. Г. Азбель, И. И. Блехман, И. И. Быховский [и др.]; под ред. Э. Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с. 19. Петров, М. С. Пружины в узлах приводов: Метод. указания к курсов. проектированию для студентов всех машиностр. специальностей / М. С. Петров, В. А. Рябов, О. А. Чихачева. – М.: МГТУ «МАМИ», 2001. – 28 с. 20. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А. А. Алямовский. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 448 с. 21. Обертюх, Р. Р. Особливості розрахунку та проектування силових ланок гідроімпульсних пристроїв для вібраційного різання та поверхневого зміцнення, виконаних у вигляді комбінації поршня з прорізною пружиною та

золотника з прорізною пружиною / *Р. Р. Обертюх, А. В. Слабкий, О. В. Поліщук* // Міжвуз. зб. "Наукові нотатки" [Луцьк]. – Вип. 42 (2013). – С. 193-201. **22.** *Беляева, А. Ю.* Влияние конструктивных параметров кольцевых пружин резцедержателей на их усталостную прочность в условиях вибрационного резания / *А. Ю. Беляева* // Мир техники и технологий. – 2013. – № 5. – С. 36-40.

Bibliography (transliterated): **1.** "Ponomarev Sergey Dmitrievich". *Official'nyj sayt kafedry RK5 MGTU im. N. E. Bauman.* Web. 10 August 2017 <<http://rk5.bmstu.ru/index.php/kafedra/istoriya/109-istoriya/242-ponomarev-sergei-dmitrievich>>. **2.** *Ponomarev, S. D.* Raschet i konstrukciya vityh pruzhin / *S. D. Ponomarev.* Moscow: ONTI, 1938. 352 p. Print. **3.** *Birger, I. A., B. F. Shorr, and R. M. Shnejderovich.* Raschet na prochnost' detalej mashin. Ed. by *I. A. Birger.* Moscow: Mashinostroenie, 1966. 616 p. Print. **4.** *Knyazeva, V. A.* "K raschetu tolstostennyh proreznnyh pruzhin". *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie.* 1975, Iss. 10, 18-22. Print. **5.** *Knyazeva, V. A.* "Issledovanie napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya tolstostennyh proreznnyh pruzhin". *Raschety na prochnost'.* Moscow: Mashinostroenie, 1977. Iss. 18, 246-256. Print. **6.** *Birger, I. A., B. F. Shorr, and G. B. Iosilevich.* Raschet na prochnost' detalej mashin. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 702 p. Print. **7.** *Ponomarev, S. D., and S. L. Andreeva.* Raschet uprugih elementov mashin i priborov. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 326 p. Print. **8.** *Birger, I. A., B. F. Shorr, and G. B. Iosilevich.* Raschet na prochnost' detalej mashin. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 640 p. Print. **9.** *Biderman, V. L., et al.* Detali mashin. Raschet i konstruirovanie. Vol. 2. Ed. by *N. S. Acherkan.* Moscow: Mashinostroenie, 1968, 408 p. Print. **10.** *Gotovcev, A. A., et al.* Spravochnik metallista. Vol. 1. Ed. by *S. A. Chernavskij and V. F. Reshchikov.* Moscow: Mashinostroenie, 1976, 768 p. Print. **11.** *Birger, I. A.* "Raschet kol'cevyyh izgibnyh pruzhin". *Raschety na prochnost'.* Moscow: Mashgiz, 1961, Iss. 7, 110-121. Print. **12.** "Birger Isaak Aronovich". *Sajt "Kosmicheskij memorial".* Web. 10 August 2017 <<http://sm.evg.-rumjantsev.ru/des3/birger.htm>>. **13.** *Birger, I. A., B. F. Shorr, and R. M. Shnejderovich.* Raschet na prochnost' detalej mashin. Moscow: Mashgiz, 1959, 459 p. Print. **14.** *Kurendash, R. S.* Konstruirovanie pruzhin. Kiev: Mashgiz, 1958. 108 p. Print. **15.** "Istoriya kafedri priladiv tochnoi mekhaniki". *Oficijnij sayt L'vivs'koї politehniki.* Web. 10 August 2017 <<http://lp.edu.ua/ptm/istoriya-kafedry>>. **16.** *Porter, M. A., and A. T. Medvedenko.* "Raschet kolec, nagruzhenykh perpendikulyarno svoej ploskosti". *Vestnik mashinostroeniya.* 1971, Iss. 2, 9-12. Print. **17.** *Shnajder, G. Z., et al.* "Raschet velichiny peremeshcheniya proreznoy pruzhiny". *Vestnik mashinostroeniya.* 1983, Iss. 5, 41-42. Print. **18.** *Vibracii v tekhnike.* 6 vols. Head of Ed. Council *V. N. Chelomej.* Vol. 4: *Vibracionnye processy i mashiny.* Ed. by *E. E. Lavendel.* Moscow: Mashinostroenie, 1981, 509 p. Print. **19.** *Petrov, M. S., V. A. Ryabov, and O. A. Chihacheva.* Pruzhiny v uzlah privodov. Moscow: MGTU «MAMI», 2001, 28 p. Print. **20.** *Alyamovskij, A. A.* SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskie zadachi. SPb.: BHV-Peterburg, 2012, 448 p. Print. **21.** *Obertyuh, R. R., A. V. Slabkij, and O. V. Polishchuk.* "Osoblivosti rozrahunku ta proektuvannya silovyh lanok gidroimpul'snih pristroїв dlya vibracijnogo rizannya ta poverhnevoho zmichennya, vikonanih u viglyadi kombinacii porshnya z prORIZNOJU pruzhinoyu ta zolotnika z prORIZNOJU pruzhinoyu". *Naukovi notatki.* – Iss. 42 (2013), 193-201. Print. **22.** *Belyaeva, A. Yu.* "Vliyanie konstruktivnyh parametrov kol'cevyyh pruzhin rezcederzhatelej na ih ustalostnyuyu prochnost' v usloviyah vibracionnogo rezaniya". *Mir tekhniki i tekhnologij.* 2013. Iss. 5, 36-40. Print.